

スポット溶接位置のばらつきが薄板構造物の振動特性に及ぼす影響*

松原 和平^{*1}, 鞍谷 文保^{*2}, 鷲尾 幸司^{*3}, 倉光 俊喜雄^{*3}

Effect of Spot Welding Location Variability on Vibration Characteristics of Plate Structures

Kazuhei MATSUBARA^{*1}, Fumiyasu KURATANI, Saiji WASHIO and Toshikio KURAMITSU

^{*1} Department of Mechanical Engineering, University of Fukui
3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui, 910-8507 Japan

Spot welds are widely used to join plate structures such as an automotive body and the vibration characteristics of the whole structure are affected by the spot welded joints. For the spot welded structure, the actual spot welding location is often misaligned from the design specific location. In this paper, we investigate the effect of welding location variability on the vibration characteristics of plate structures based on Fuzzy finite element method (FFEM) with Monte Carlo simulation. From the membership functions of the natural frequencies from the FFEM and the histograms of the natural frequencies from the interval analysis in the FFEM, we examine the modes that are strongly affected by welding location variability and the locations that strongly affect the vibration characteristics. As an example structure, the structure consisting of hat section steel plates joined together by 20 spot welds at the flanges is used.

Key Words : Modal Analysis, Finite Element Method, Natural Frequency, Monte Carlo Simulation, Fuzzy Number, Spot Welding Location

1. 緒 言

スポット溶接は薄板構造の接合法として広く用いられている。自動車車体の場合、溶接点数は数千もあり構造全体の振動特性に大きな影響を及ぼすので、溶接位置は構造設計において重要となる。しかし、スポット溶接された構造においては、溶接位置は図面通りではなく、設計位置からのずれを有する。これは、系統的なずれではなく、同じ溶接位置でも溶接された構造ごとに異なり、ある範囲のばらつきを持つ。そこで、適切な構造設計のためには、スポット溶接位置のばらつきが構造の振動特性に及ぼす影響を明らかにしておく必要がある。

スポット溶接位置や溶接点数に関する研究として、Ouisse ら⁽¹⁾⁽²⁾はスポット溶接を取り除いたときの構造全体の固有振動数に及ぼす影響を推定し、効率的にスポット溶接点数を削減する方法を提案している。d'Ippolito ら⁽³⁾は連続するスポット溶接を一つの溶接レイアウトラインとし、溶接ラインごとの溶接間隔を最適化することで溶接点数を削減する方法を提案している。Chetwynd ら⁽⁴⁾はスポット溶接の位置ずれが周波数応答関数に及ぼす影響を調べているが、複数の溶接位置がばらつく場合の検討は行われていない。以上のように溶接点数の削減に関する研究は多く見られるが、溶接位置のばらつきが振動特性に及ぼす影響については詳細な検討はなされていない。

本論文では、溶接位置のばらつきがスポット溶接された薄板構造の振動特性に及ぼす影響を詳細に検討する。検討方法として、最初に溶接位置を一定量だけずらしたときの固有振動数および周波数応答関数の変化を有限要素解析で調べ、影響の大きいモードを特定する。次に、影響の大きいモードについてファジィ有限要素法で固有振動数の可能性分布を表すメンバーシップ関数を求め、さらにファジィ有限要素法の区間解析結果を基に固有振動数のばらつき分布を求めて、溶接位置のばらつきが振動特性に及ぼす影響を検討する。その結果とスポット溶

* 原稿受付 0000 年 00 月 00 日

^{*1} 学生員, 福井大学大学院工学研究科 (〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1)

^{*2} 正員, 福井大学大学院工学研究科

^{*3} サイバネットシステム(株) (〒540-0028 大阪府大阪市中央区常盤町 1-3-8)

E-mail: kuratani@mech.u-fukui.ac.jp

接部のモードひずみエネルギーを比較し、振動特性に及ぼす影響が大きい溶接位置を推定するための指針を示す。なお、ファジィ有限要素法の区間解析にはモンテカルロシミュレーションを用いる。

2. スポット溶接部の有限要素モデル

2・1 多点拘束モデル

本論文では、スポット溶接部の解析モデルとして、図1に示す多点拘束（Multi-Point Constraint : MPC）モデルを用いる⁽⁵⁾。多点拘束モデルを用いる利点は、溶接位置をずらしたときでも鋼板の要素分割を変更する必要がないことである。

多点拘束とは、有限要素モデルの複数の節点変位間を線形結合で定義するものである。本論文で用いる多点拘束モデルでは、溶接ナゲット（溶接部中央の熔融凝固部）を1個のソリッド要素で、上下の鋼板をシェル要素でモデル化し、ソリッド要素の節点と上下のシェル要素（パッチ）の節点をRBE3（Rigid Body Element 3）と呼ばれる要素で結合する。これにより、上下のシェル要素の節点位置とは独立にソリッド要素を配置できる。RBE3要素は多点拘束方程式を生成し、ソリッド要素の節点とシェル要素の節点を関係づける。多点拘束方程式の係数は、ソリッド要素の節点に作用する並進力をシェル要素の節点に分配させる考え方に基づき決められる。図2はソリッド要素の1個の節点とシェル要素の4個の節点をRBE3要素でつないだ状態を示す。スポット溶接部モデルでは5個の節点は同一平面上に存在し、またソリッド要素は3方向の並進変位自由度のみを有する。その場合、ソリッド要素の節点の並進変位成分は、多点拘束方程式を用いてシェル要素の4個の節点の並進変位成分の線形結合で、式(1)のように表すことができる。

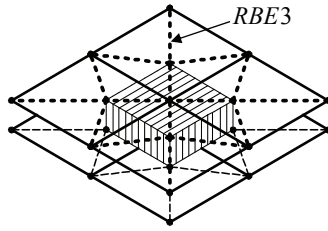


Fig. 1 Solid element node and shell element nodes connected with RBE3 elements

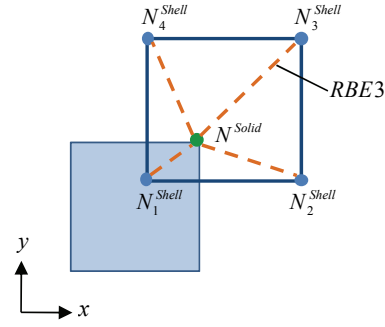


Fig. 2 Concept of force distribution

$$\begin{aligned} u_x^{Solid} &= \sum_{i=1}^4 \alpha_{xi} u_{xi}^{Shell} + \sum_{i=1}^4 \alpha_{yi} u_{yi}^{Shell} \\ u_y^{Solid} &= \sum_{i=1}^4 \beta_{xi} u_{xi}^{Shell} + \sum_{i=1}^4 \beta_{yi} u_{yi}^{Shell} \\ u_z^{Solid} &= \sum_{i=1}^4 \gamma_{zi} u_{zi}^{Shell} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 u_x^{Solid} 、 u_y^{Solid} 、 u_z^{Solid} はソリッド要素の節点の x 、 y 、 z 方向の並進変位成分、 u_{xi}^{Shell} 、 u_{yi}^{Shell} 、 u_{zi}^{Shell} はシェル要素の i 番目の節点の x 、 y 、 z 方向の並進変位成分である。 α_{xi} 、 α_{yi} 、 β_{xi} 、 β_{yi} 、 γ_{zi} は多点拘束方程式の係数であり、パッチの形状、大きさ、さらにソリッド要素とパッチの位置関係により決まる。

2・2 運動方程式⁽⁶⁾

RBE3要素で結合する前のスポット溶接構造全体の運動方程式は、一般に次式で表される。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (2)$$

ここで、 $[M]$ と $[K]$ は質量行列と剛性行列で、 $\{u\}$ は節点変位ベクトルである。式(1)を用いると、 $\{u\}$ はソリッド

要素の節点変位 $\{u^o\}$ を除いた節点変位ベクトル $\{u^A\}$ だけで、次式のように表すことができる。

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u^A \\ u^o \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ C_o \end{bmatrix} \{u^A\} = [C] \{u^A\} \quad (3)$$

ここで、 $[I]$ は単位行列で、 $[C_o]$ は多点拘束方程式の係数を含む行列である。式 (2) に式 (3) を代入し、左から $[C]$ の転置を掛ければ、ソリッド要素の自由度を縮約した質量行列 $[M^A]$ と剛性行列 $[K^A]$ が

$$\begin{aligned} [M^A] &= [C]^T [M] [C] \\ [K^A] &= [C]^T [K] [C] \end{aligned} \quad (4)$$

として得られる。式 (4) はソリッド要素の自由度が縮約された結果であるが、ソリッド要素の質量と剛性が RBE3 要素で結合されるシェル要素（パッチ）に分配されることを意味する。ソリッド要素の質量と剛性の分配のされ方は多点拘束方程式の係数により決まる。全体構造のモード特性（固有角振動数 ω_r と振動モード $\{\phi_r\}$ ）は、次式の固有値解析で得られる。

$$([K^A] - \omega_r^2 [M^A]) \{\phi_r\} = \{0\} \quad (5)$$

3. ファジィ有限要素法

本論文では、溶接位置のばらつきが振動特性に及ぼす影響をファジィ有限要素法（ファジィ FEM）⁽⁶⁾を用いて検討する。

ファジィ数は数値上のファジィ集合のことで、帰属度はメンバーシップ関数で定義される。ファジィ FEM の場合、モデルパラメータのばらつきなどの不確実性をファジィ数で表現する。具体的な特性はメンバーシップ関数で定義されるが、その形状は解析者の知識、経験あるいは実験データなどから決められる。メンバーシップ関数に求められる条件は、連続的で凸性さらに正規性を持つことである。本論文では、メンバーシップ関数が

$$\mu_{p_i} = \begin{cases} 1 - (p_i^C - p_i) / (p_i^C - p_i^L) & \text{for } p_i^L \leq p_i \leq p_i^C \\ 1 - (p_i - p_i^C) / (p_i^U - p_i^C) & \text{for } p_i^C \leq p_i \leq p_i^U \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

で定義される図 3 のような三角型ファジィ数を用いる。ここで p_i^C は代表値、 p_i^L と p_i^U はパラメータの下限值と上限値である。モデルパラメータの不確実性がファジィ数で表現できれば、ファジィ演算で出力ファジィ数、すなわち応答挙動のメンバーシップ関数を求めることができる。しかし、拡張原理を用いたファジィ演算を FEM 解析に適用することは困難であるので、 α カット法と区間解析法を組み合わせた方法を用いる。具体的には、図 4 のようにモデルパラメータのメンバーシップ関数を α カット法でいくつかのレベルに分け、ファジィ集合をクリスプ集合に還元する。その後、図 5 のように各 α レベルで区間解析を行い、各レベルの応答挙動の区間を求める。それをレベルごとに積み重ねることで応答挙動のメンバーシップ関数を得る。区間解析にはモンテカルロシミュレーションを用いる。モデルパラメータのメンバーシップ関数をモデルパラメータの可能性分布と考えると、応答挙動のメンバーシップ関数は応答挙動の可能性分布になる。なお、本論文では区間解析にモンテカルロシミュレーションを用いるため、区間解析の結果は区間内での応答挙動のばらつき分布の解析に利用可能である。

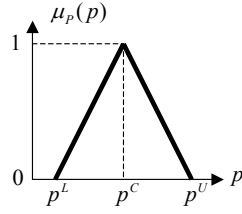


Fig.3 Fuzzy number with triangular membership function

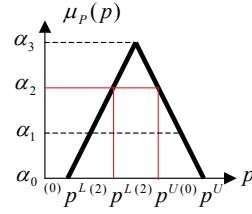


Fig.4 Decomposition of a fuzzy number into the intervals

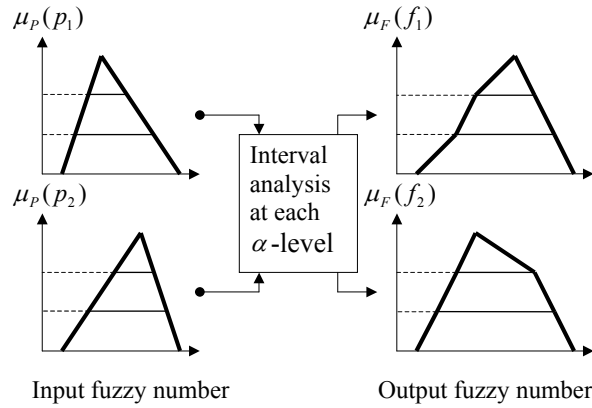


Fig.5 α -cut concept and interval analysis

4. スポット溶接構造

4・1 スポット溶接位置のばらつき

検討対象として、図 6 に示す断面形状がハット型の鋼板 2 枚をフランジ部で片側 10 点スポット接合した構造を取り上げる。図中の●はスポット溶接の基準位置を示す。同寸法の試験体を 3 個（試験体 A, B, C）製作し、それぞれのスポット溶接位置の基準位置からのずれ量を調べた。ここでは、溶接構造の y 方向のずれだけに注目した。スポット溶接位置の基準位置からのずれ量の平均とそのばらつき範囲を表 1 に示す。+は基準位置から内側方向へのずれを、-は外側方向へのずれを表わす。試験体 C のずれ量が最も大きく、外側に 2.0 mm、内側に 1.5 mm である。そこで、これ以後の解析においてはスポット溶接位置のばらつき範囲を-2.5mm から+2.5mm とし、ばらつきが振動特性に及ぼす影響を調べる。

Table 1 Spot welding location variation

Specimen	Average [mm]	Range [mm]
A	0.73	-1.0 ~ +1.5
B	0.75	-2.0 ~ 0
C	0.98	-2.0 ~ +1.5

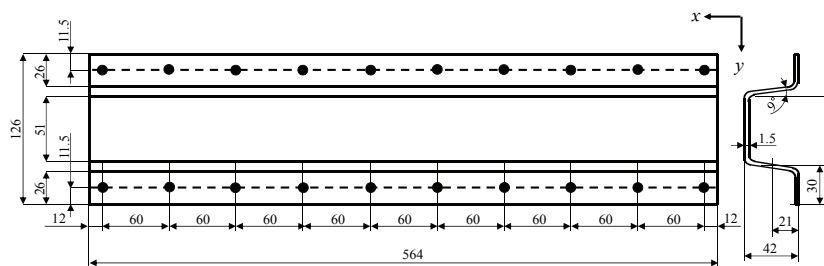


Fig.6 Reference spot welding location

4・2 有限要素モデル

本論文では、振動解析に有限要素解析プログラム Ansys を、溶接位置の変更など解析の自動化には設計支援ツール Optimus を用いた。図 6 のハット型材 2 枚をフランジ部でスポット溶接した構造の有限要素モデルを図 7 に示す。ハット型材はシェル要素 (Shell 181) で、溶接ナゲットはソリッド要素 (Solid 185, 一辺 6 mm の正方形, 高さ 1.5 mm) でモデル化した。ソリッド要素の節点と上下のシェル要素の節点は RBE3 要素を用いて結合した。材料特性はヤング率 $E=211 \text{ GPa}$, 密度 $\rho=7870 \text{ kg/m}^3$, ポアソン比 $\nu=0.3$ とした。

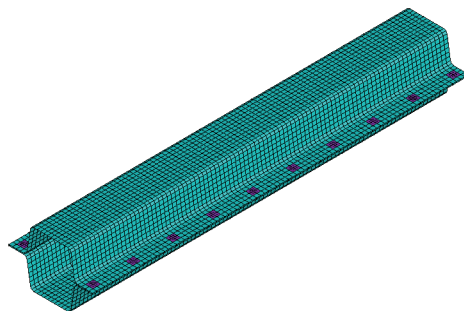


Fig.7 FE model for spot welded structure

4・3 有限要素モデルの妥当性

有限要素モデルを用いて検討を行う前に、有限要素モデルの妥当性を検証する。そのために、溶接位置の基準位置からのずれ量の平均値が 3 試験体の中央である試験体 B に対してインパクト加振法で周波数応答関数 (FRF) を測定し、有限要素モデルから得られた FRF (解析結果) と比較する。図 8 に測定結果と解析結果の周波数応答関数の比較を示す。実線が測定結果、破線が解析結果である。図において、800Hz あたりまでは測定結果と解析結果のピーク周波数がほぼ一致していることがわかる。900Hz を越えると測定結果と解析結果の FRF が異なっている。この理由として、測定結果は溶接位置のばらつきの影響を受けているためと考えられる。以後、図 7 の有限要素モデルを用いて解析を行い、スポット溶接位置のばらつきが振動特性に及ぼす影響を調べる。

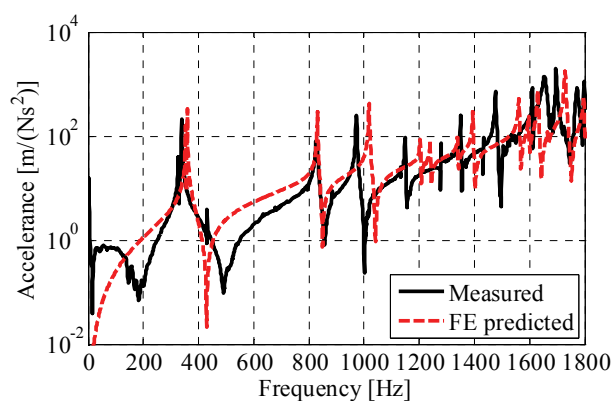


Fig.8 Comparison of the measured and FE predicted frequency response functions

5. 溶接位置のばらつきの影響

5・1 溶接位置を一定量移動させた場合

図 6 の溶接位置を y 方向に一定量だけ平行に移動させ、そのときの固有振動数と周波数応答関数 (FRF) を求めた。移動量は、ばらつきの最大値である +2.5mm (片側 10 点, 計 20 点を基準位置より内側に移動) と -2.5mm (基準位置より外側に移動) とした。図 9 に基準位置 (0mm) のときの固有振動数に対する変化率を示す。なお、

溶接位置を移動すると固有振動数のモード順が変わる場合がある。本論文では移動前後の振動モードの対応を MAC 値を基に調べ、対応するモード間で固有振動数の変化率を求めた。

図 9 において、22 次、25 次、27 次、30 次モードで固有振動数の変化率が $-20\% \sim -8\%$ と大きいことがわかる。一方、3 次、4 次、13 次モードなどは固有振動数の変化率が 0.02% 以下である。図 10 に変化率が大きい 22 次、25 次、27 次、30 次の振動モードを、図 11 に変化率が小さい 3 次、4 次、13 次の振動モードを示す。2 次モードは全体が前後に曲がるように、25 次モードは全体が上下方向に開くように変形している。27 次と 30 次モードは端部が上下方向に開くように変形している。いずれのモード形状も溶接部の変形が大きいことがわかる。一方、3 次、4 次、13 次モードは上下のフランジ部が一体で変形しており、溶接部の変形が小さくなっている。

図 12 に基準位置 (0mm) との FRF の比較を示す。1200Hz あたりまでは、基準位置と $+2.5\text{mm}$ と -2.5mm のピーク周波数は一致している。1200Hz を超えたあたりで、基準位置より外側に移動した場合の FRF に大きなピークが見られる。この青線で囲んだ 2 つのピークのモード (17 次と 18 次モード) は、黒線で囲んだ基準位置の 2 つのピーク (25 次と 27 次モード) とモード形状が類似している。すなわち、溶接位置を外側に移動することで基準位置の 25 次と 27 次モードが移動後の 17 次と 18 次モードになり、大幅なモードの入れ替わりが生じる結果となった。

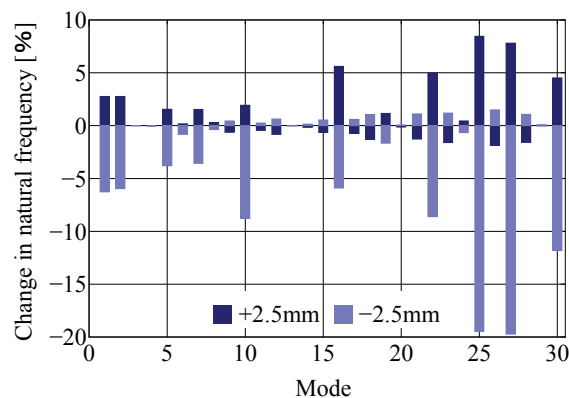


Fig.9 Change in natural frequency (Constant shift distance)

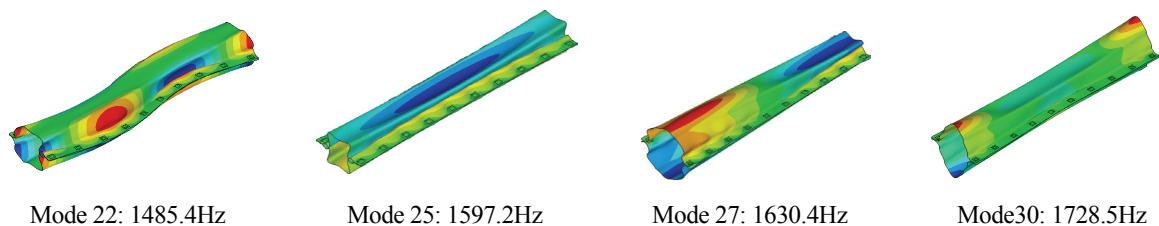


Fig.10 Mode shapes with large change in natural frequency

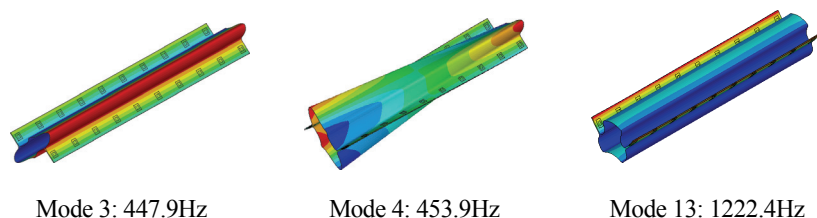


Fig.11 Mode shapes with small change in natural frequency

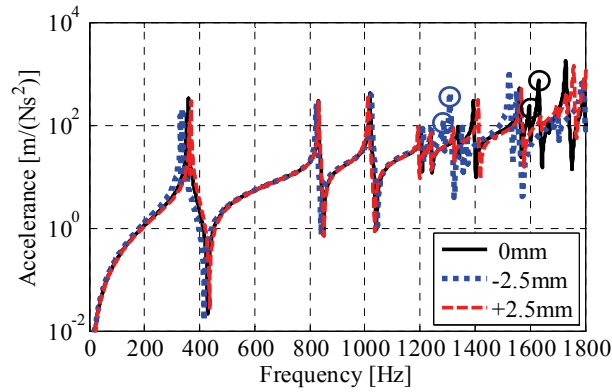


Fig.12 Change in frequency response function (Constant shift distance)

5・2 ファジィ FEM による検討

5・1 節ではすべての溶接位置を同量だけ移動させた。ここでは、各溶接位置をある範囲内で任意に変化させ、各溶接位置のずれ量の組み合わせが固有振動数の変化に及ぼす影響を検討する。検討方法として、区間解析にモンテカルロシミュレーションを組み込んだファジィ有限要素法を用いる。

20箇所の各溶接位置のずれ量を三角型入力ファジィ数とし、表2のように α カットで5レベルの区間に分ける。そして、 α レベルごとに固有振動数の変化率の区間を求める。各レベルのモンテカルロシミュレーションの試行回数は2000回とした。なお、固有振動数の対応はMAC値を用いて基準位置の振動モードとの対応を調べ、MAC値が0.7以上の対応がある場合のモード間において固有振動数の変化率を求めた。

図13に α レベルが0（最大区間）のときの各モードの固有振動数の変化率の範囲を示す。5・2 節の溶接位置を一定量移動させた場合と同様に、22次、25次、27次、30次モードで固有振動数の変化率が大きく、3次、4次、13次モードなどは変化率が小さい。しかし、変化率の絶対値は溶接位置を一定量移動させた場合に比べて小さくなっている。これは、区間解析におけるモンテカルロシミュレーションの試行回数が2000回ではすべての溶接位置を一定量移動させる組み合わせが現れなかったことに加え、モード形状が大きく変化する場合はモードの対応が見つからず、その結果として固有振動数の変化率の厳密な区間が得られなかったと考える。本論文では、溶接位置のばらつきが振動特性に及ぼす影響の傾向を明らかにすることを目的に、試行回数2000回の結果を基に検討する。

Table 2 Interval of shift distance for each α -level

α -level	Lower bound P_i^L [mm]	Upper bound P_i^U [mm]
5	0	0
4	-0.5	0.5
3	-1.0	1.0
2	-1.5	1.5
1	-2.0	2.0
0	-2.5	2.5

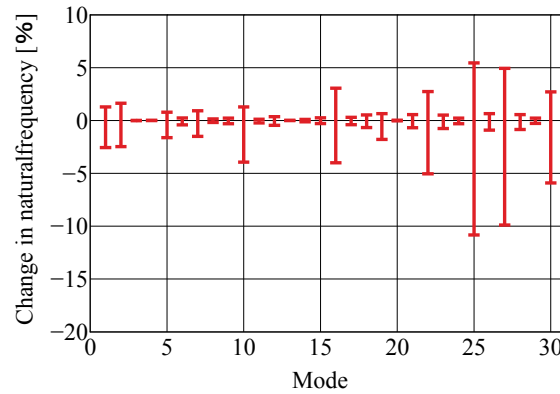


Fig.13 Change in natural frequency (Maximum interval)

図 14 に、固有振動数の変化率が大きい 22 次、25 次、27 次、30 次モードの固有振動数の変化率のメンバーシップ関数を示す。固有振動数の変化率のメンバーシップ関数は、溶接位置のばらつきの範囲に対する固有振動数のばらつきの可能性範囲を示すものである。また、入力（ばらつき）のメンバーシップ関数が三角型であるため、出力（固有振動数の変化率）のメンバーシップ関数のレベル間の変化率（傾き）が感度の違いを表すことになる。

図において、22 次、25 次、27 次モードの固有振動数の変化率は、固有振動数が低下する場合、 α レベルが 5 から 0 に変化する（ばらつきの区間が大きくなる）にともない直線的に低下している。一方、30 次モードにおいては、固有振動数が低下する場合、 α レベルが 3 を境に急激に低下している。固有振動数が増加する場合は、すべてのモードで α レベルが 5 から 0 に変化するにともない変化率はほぼ直線的に増加している。したがって、30 次モードの固有振動数の低下側を除けば、入力（ばらつき）のメンバーシップ関数が三角型で、出力（固有振動数の変化率）のメンバーシップ関数もほぼ三角型であることから、レベルごとの感度はほぼ同じで固有振動数の変化を線形的に予測することが可能といえる。

本論文では、溶接位置のばらつきは短辺方向のみとして検討した。短辺方向の場合は、溶接位置を外側に広げる場合も内側に狭める場合も、固有振動数の変化がほぼ直線的であった。今後は長手方向のばらつきも考慮した検討を行い、固有振動数の変化の傾向を検討する予定である。

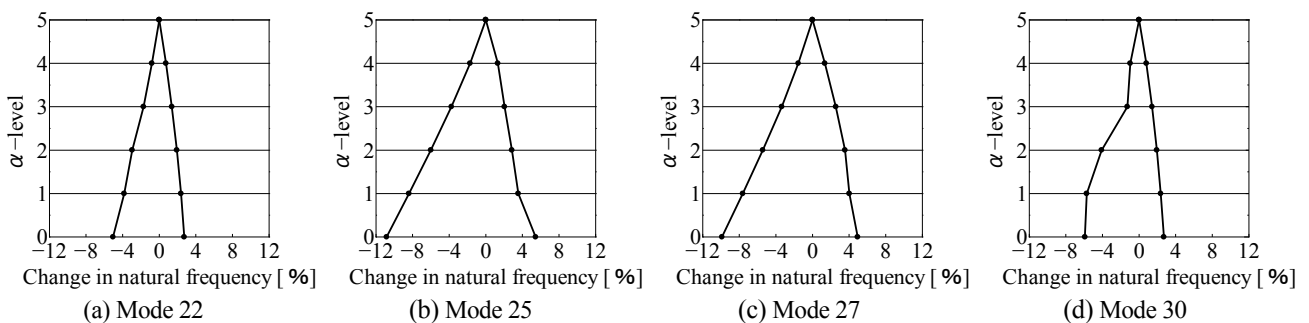


Fig.14 Membership functions of the change in natural frequency

5・3 モードひずみエネルギーに基づく溶接位置の影響度評価

5・3 節では固有振動数の変化に及ぼす溶接位置の影響度の評価方法を、5・4 節の後半部でその妥当性を検討する。

溶接位置の影響度を評価する方法として、モードひずみエネルギーの利用可能性を検討する。そこで、固有振動数の変化率が大きい 22 次、25 次、27 次、30 次モードについて、ソリッド要素（溶接ナゲット）のモードひずみエネルギーを調べた。その結果を図 15 に示す。縦軸はモード質量が 1 となるように正規化したときのモードひずみエネルギーで、横軸は図 16 に示す溶接位置番号である。図において、22 次と 25 次モードでは 4 端点（1, 10, 11, 20）以外の溶接位置のモードひずみエネルギーが大きく、27 次と 30 次モードでは 4 端点およびその近傍でのモードひずみエネルギーが大きいことがわかる。本節で得られたひずみエネルギーが大きい溶接位置と次

節で検討する固有振動数の変化に及ぼす影響が大きい溶接位置はよい対応を示しており，モードごとに影響の大きい溶接位置を推定する指針として，スポット溶接モデルのソリッド要素のモードひずみエネルギーを利用することは有効と考えられる．しかし，モードひずみエネルギーは相対値であるため，絶対的な影響度（感度）は検討できない．その場合には，モードひずみエネルギーを基に特定したスポット溶接位置の組み合わせで，図 14 のようなメンバーシップ関数を求め影響度を調べれば，効率的に影響度（感度）を検討することが可能と考える．

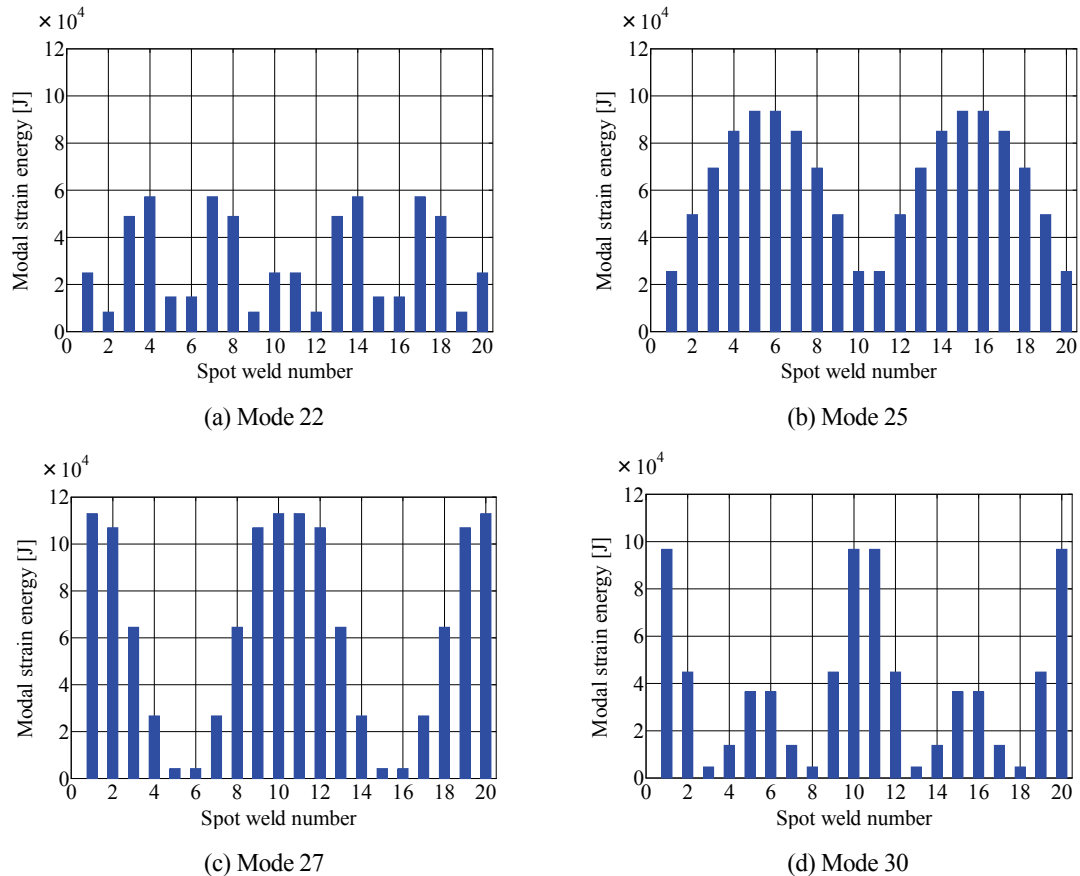


Fig.15 Modal strain energy

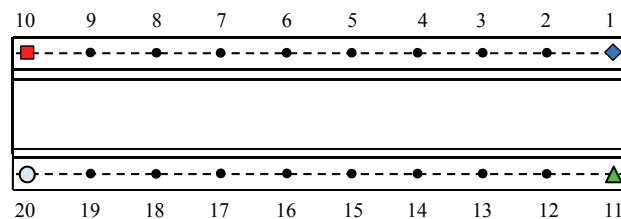


Fig.16 Spot welding location

5・4 固有振動数のばらつき分布

5・2 節ではばらつきの変動区間に対する固有振動数の変動区間の変化を検討した．ここでは，5・2 節における α レベルが 0 の区間（溶接位置のばらつき範囲が-2.5mm から+2.5mm）のデータを用いて，固有振動数のばらつき分布を調べる．

図 17 に固有振動数の変化が大きかった 22 次，25 次，27 次，30 次モードの固有振動数の度数分布図を，表 3 に各モードの度数総計，固有振動数の変化率の平均値，最小値，最大値，変動係数，尖度，歪度を示す．各モードの度数総数は，MAC 値が 0.7 以上となるモードに対してのみ固有振動数の変化を求めたために，試行回数 2000

回より少なくなっている。その結果、図 17 の 30 次モードのように、中央付近で度数が小さい分布が現れたと考えられる。

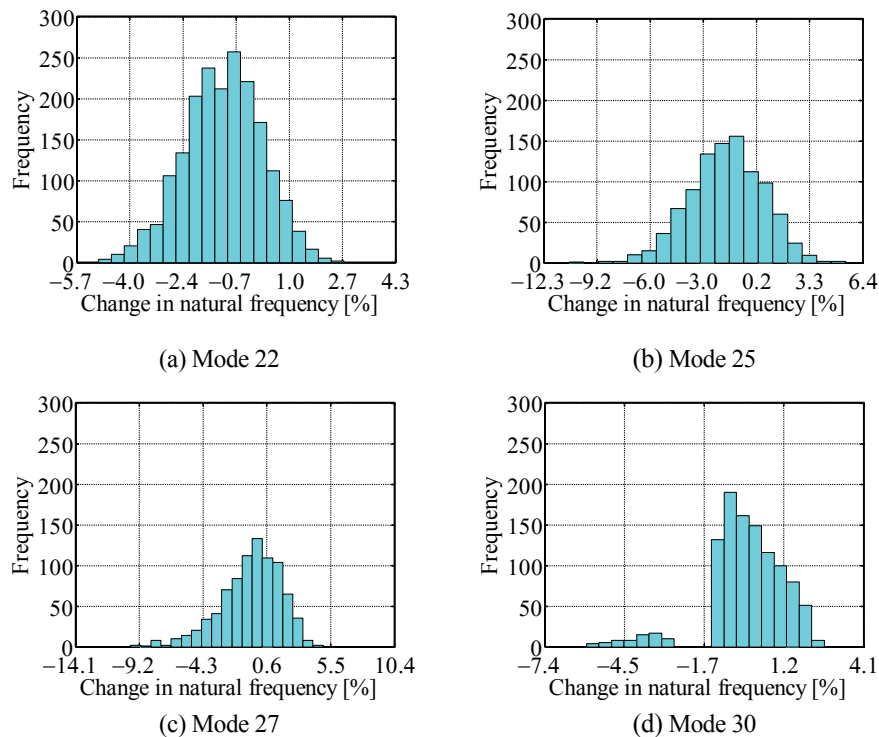


Fig.17 Histograms of the change in natural frequency

Table 3 Statistics parameters for the change in natural frequency

Mode	Total frequency	Average	Min	Max	Coefficient of variance	Kurtosis	Skewness
22	1910	1.1	-5.0	2.7	0.012	-0.14	-0.14
25	967	1.6	-10.8	5.4	0.022	0.21	-0.19
27	854	0.6	-9.9	4.9	0.023	0.74	-0.75
30	1054	0.1	-5.9	2.7	0.014	2.85	-1.24

本論文では、モンテカルロシミュレーションにおいて、溶接位置のばらつきを一様分布の乱数を用いて与えている。それにもかかわらず、図 17 の固有振動数の変化率の度数分布はすべてのモードで一様分布にならず、中央から変化率の最大、最小になるにつれて度数が少なくなっている。これは、多くのばらつきの組み合わせにおいてばらつきの影響が打ち消し合い、固有振動数の変化率の変化が小さくなった結果と考えられる。

表 3 において、22 次と 30 次モードは変動幅（最小と最大の差）が比較的小さく、25 次と 27 次モードは変動幅が大きくなっていることがわかる。また、22 次と 30 次モードの変動係数は同程度で、25 次と 27 次モードの変動係数も近い。一方、尖度と歪度は 22 次と 30 次モードで大きく異なり、25 次と 27 次モードでも大きく異なる。すなわち度数分布の形状が異なる。この度数分布の形状が異なる理由として考えられることは、各溶接位置のずれが固有振動数に及ぼす影響がモードごとに異なることである。そこで、固有振動数に及ぼす溶接位置の影響を検討する。

例として、5・3 節でモードひずみエネルギーの変化が大きかった図 16 に示す端部の 4 点の溶接位置（1, 10, 11, 20）を取り上げ、22 次、25 次、27 次、30 次モードの固有振動数に及ぼす影響を調べる。その方法として、図 17 の度数分布図において、固有振動数の変化率の絶対値が大きいものから順に 30 個の組み合わせ（すべてマイ

ナス側)における溶接位置のずれを整理した。その結果を図18に示す。縦軸は各溶接位置の基準位置からのずれ量で、横軸は溶接位置の組み合わせ番号で、変化率の絶対値が大きい(変化率はすべてマイナスなので固有振動数が低い)方から順に1から30としている。図において、22次と25次モードでは4端点ともずれ量は基準位置の外側(-)と内側(+)にはほぼ均等に分布している。一方、27次と30次モードでは、4端点とも外側(-)へのずれ量が多いことがわかる。以上より、27次と30次モードでは端部の4点のばらつきの影響が大きいといえる。しかし、22次と25次モードでは、固有振動数が低下する場合の溶接位置のずれ量であることを考慮すると端部の4点のばらつきの影響が特に大きいとはいえない。これらの結果、変動係数が近い22次と30次モード、25次と27次モードでは度数分布の形状が異なつたと考えられる。したがって、固有振動数のばらつきを小さくするためには、溶接構造端部のばらつきを小さくすることは有効だが、モードによっては端部以外の影響が大きいために効果が小さくなる可能性があるといえる。

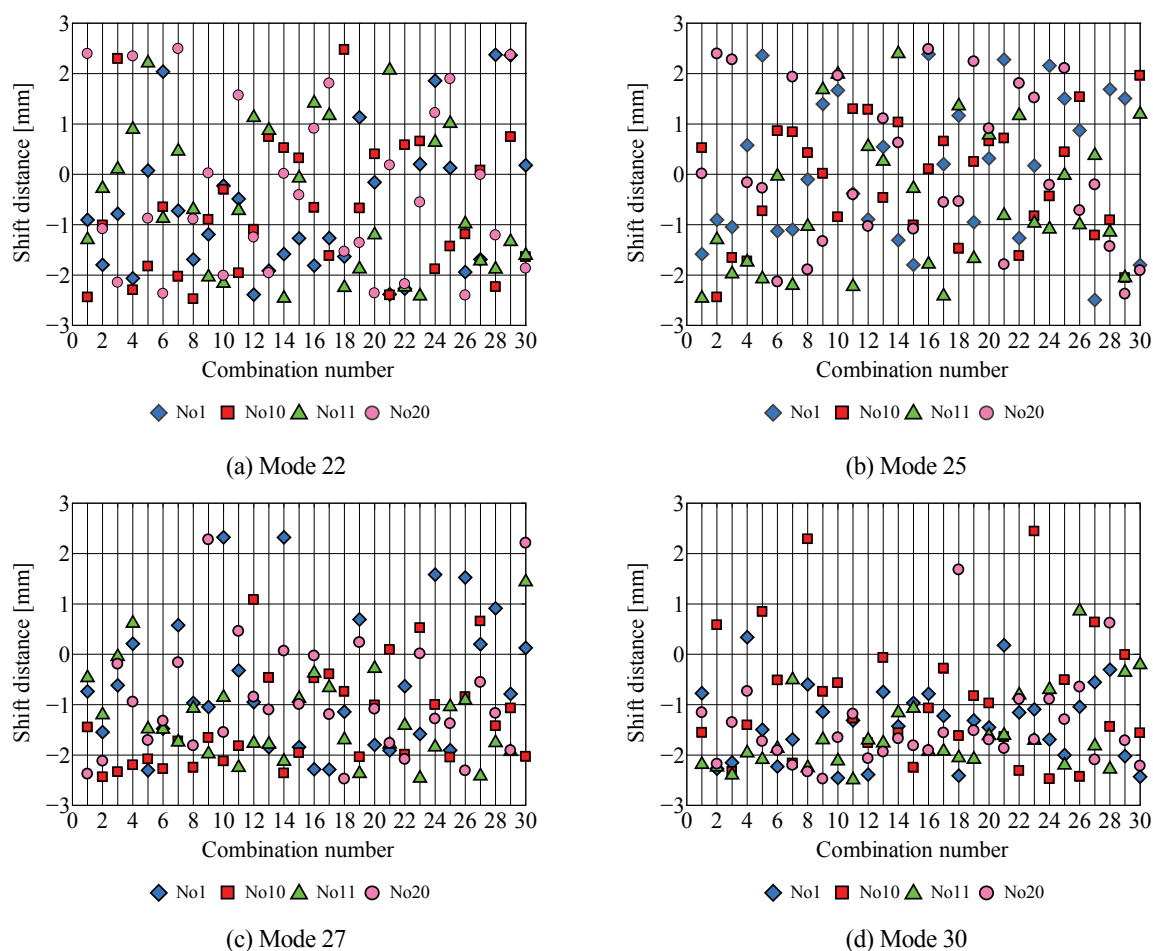


Fig.18 Shift distance from the reference location

図18の結果と5・3節で検討したモードひずみエネルギー(図15)の結果を比較すると、22次と25次モードでは、端部以外の溶接位置のばらつきの影響も大きいことと端部以外の溶接位置のモードひずみエネルギーが大きいことが対応する。一方、27次と30次モードでは、4端点のばらつきの影響が大きいことと端点付近の溶接位置のモードひずみエネルギーが大きいことが対応している。したがって、モードごとにばらつきの影響の大きい溶接位置を推定する指針として、5・3節で検討したスポット溶接モデルのソリッド要素のモードひずみエネルギーを利用することが可能といえる。

6. 結 言

本論文では、溶接位置のばらつきがスポット溶接された薄板構造の振動特性に及ぼす影響について検討した。検討対象として、断面形状がハット型の鋼板 2 枚をフランジ部でスポット接合した構造を取り上げた。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) スポット溶接位置のばらつきの影響を受けやすいモードと受けにくいモードが存在する。受けやすいモードはフランジ部が一体で変形せず、溶接部の変形が大きいモード形状である。
- (2) ファジィ有限要素法において、入力（溶接位置のばらつき）のメンバーシップ関数を三角型で与えたとき、出力（固有振動数の変化率）のメンバーシップ関数もほぼ三角型になった。したがって、レベルごとの感度はほぼ同じで固有振動数の変化を線形的に予測することが可能といえる。
- (3) モンテカルロシミュレーションにおいて、一様分布のばらつきを与えたにもかかわらず、固有振動数の変化率のばらつき分布は変化が小さいところで度数が大きくなった。これは、多くのばらつきの組み合わせにおいてばらつきの影響が打ち消し合った結果と考えられる。
- (4) 溶接位置の影響において、溶接構造端部のばらつきはすべてのモードに対して大きな影響を及ぼすことはなく、端部以外の溶接位置のばらつきの影響が大きいモードも存在する。
- (5) 固有振動数に及ぼす影響の大きい溶接位置を推定する指針として、スポット溶接モデルのソリッド要素のモードひずみエネルギーが利用可能である。しかし、モードひずみエネルギーは相対値であるため、絶対的な影響度は検討できない。その場合には、ファジィ有限要素法などで、モードひずみエネルギーを基に特定したスポット溶接位置の組み合わせで、影響度を調べるのが有効と考える。

文 献

- (1) Ouisse, M., Cogan, S., Huang, S. and Guillaume, B., "An Efficient Procedure for Spot Welds Optimization in Automotive Structures", *Proceedings of IMAX-XXIV*, (2006).
- (2) Ouisse, M. and Cogan, S., "Robust Design of Spot Welds in Automotive Structures: A Decision-Making Methodology", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 24, (2010), pp. 1172-1190.
- (3) d'Ippolito, R., Raniolo, R., Olivero, M., Meneguzzo, N., Puleo, V., Donders, S. and Hack, M., "Multi-Disciplinary Optimization of a Vehicle Spot Weld Layout under Durability and NVH Constraints", *Proceedings of ISMA2008*, (2008), pp. 4111-4125.
- (4) Chetwynd D. and Vige, D., "The Dynamic Effects of Uncertainties within Automotive Spot Welds", *Proceedings of IMAX-XXV*, (2007).
- (5) 鞍谷文保, 山内貴士, "多点拘束を利用したスポット溶接部の簡易モデルとその動的特性", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 77, No. 777 (2011), pp. 128-139.
- (6) Kuratani, F., Ishizuka, S. and Washio, S., "An Analysis Method for Fuzzy Natural Frequency using Response Surface Methodology", *Journal of System Design and Dynamics*, Vol.2, Issue 1 (2008), pp. 64-75.